日偏食期间深圳市天文台气象要素分析*

郑建川 梅林 王栋 吴亮 叶嘉晖
（深圳市国家气候观象台（深圳市天文台）， 518040， 广东 深圳）

摘 要：2020年6月21日，我国境内发生了日环食，环食带经过西藏、四川、重庆、湖南、江西、福建和台湾，我国其他地方可见日偏食。深圳市天文台的太阳望远镜观测了日偏食的整个过程，同时，基地内的气象设备观测了太阳辐射、温度、湿度和气压等气象参素。日食期间太阳观测和气象要素观测的分析结果表明：（1）从日食初亏到食甚，太阳辐射、温度和气压均有下降，随后缓慢上升，受天气条件影响，极小值时刻相对于食甚时刻有滞后，其中，太阳辐射滞后1.37分钟，温度滞后6.37分钟，气压滞后10.37分钟；（2）从初亏到食甚，相对湿度先上升到极大值，然后持续33分钟，随后下降，极大值时刻相对于食甚时刻滞后6.37分钟；（3）对比日食前后两天气象要素变化，日食时太阳辐射、温度和相对湿度的变化率约比没有日食时高1个数量级，气压的变化率相差不大；（4）日食期间，日面相对强度和气象要素之间有很好的相关性，相关系数分别达0.95、0.89、-0.82和0.75。

关键词： 日食；太阳辐射；温度；相对湿度；气压
中图分类号：P182.2；P416.2 **文献标识码：** **文章编号：**

1 日食期间气象要素研究现状 [1]

月球运动到地球和太阳之间并且三者成一条直线时就会发生日食，根据月球在地球上的投影情况，日食可分为日全食、日环食、日偏食和全环食[1]。长久以来，日食除了给人类提供震撼的观感外，也提供了独特的科学研究环境。最著名的例子就是爱丁顿爵士观测 1919 年的日食，验证了爱因斯坦广义相对论中的光线偏转预言[2]。日全食期间可以直接看到太阳外层大气——日冕，因为日冕稀薄暗弱，平时会淹没在太阳光球发出的强烈的光线中，有时在食分（日面直径被遮挡部分和太阳视直径的比值）很大的日环食时也能看到微弱的日冕结构。日冕的精细结构动力学特征、日冕加热问题和日食期间的生物学效应等研究是日食期间重要的研究课题[3-4]，也是地面和空间太阳观测研究的重要补充。

日食会引发气象要素的变化，但直到1980年2月16日的日全食之后，日食期间气象变化的相关论文才逐渐增多[5]。定量测量发现，日食开始后，太阳辐射和气温会下降[6]，并且在天气晴朗，大气稳定的情况下，太阳辐射（太阳照度或天空亮度）最小的时间和食甚的时间相同，太阳照度的变化和日食有很好的一致性，有云和雾的天气情况下，太阳辐射到达最小的时间会有所滞后[7]，而天空亮度则受大气质量和环境的影响，城市和工业区现在日全食期间的天空亮度比以前日全食期间的要亮[8]。全食期间，太阳辐射会在食甚时刻下降到0 W m^{-2}，气温会下降几摄氏度[9]。全食结束后，太阳辐射和气温会逐步上升[10]。华行祥等[11]分析了2009年7月22日日全食期间的杭州气象观测后发现，在20000多米的高空温度会变化0.6~3.0℃，而地面温度变化最大为2.3℃。马德栗等[12]分析了本次日全食期间武汉市的气象要素变化后发现，日全食期间，太阳总辐射量会有大幅度下降，由于温度相对于太阳辐射有滞后性，所以气温呈现上升——下降——上升的过程，变化范围在1.3℃。Mahmood等[13]观测到2017年美国日全食期间，太阳辐射从大于800 W•m^{-2}下降到0 W•m^{-2}，气温下降了4.5 ℃。日食同样会

*基金项目：国家自然科学基金 (41475026)资助
收稿日期：； 修订日期：
作者简介：郑建川，男，工程师，博士. 研究方向：太阳物理。E-mail: ynujchzheng@126.com

导致耗电和产能的变化，2015年3月20日的日食期间，英国电力需求增加了约3千兆瓦时，比平时同时期增加4%，而风能和光伏发电则减少了1.5千兆瓦时[14]。

2020年6月21日发生的日环食是本世纪我国最壮观的日环食，最大食分可达0.997（来源：国家天文科学数据中心日食计算器，https://nadc.china-vo.org/eclipse/），环食带经过我国西藏、四川、重庆、湖南、江西、福建和台湾，但是环食带很窄，宽度仅20多千米，全国其他地方只可见日偏食。深圳市天文台位于环食带以南，可见日偏食，最大食分也高达0.901。图1(a)显示了中国境内日食路径全景图；图1(b)是深圳偏食放大图，显示了深圳市天文台的地理坐标、偏食食分以及初亏、食甚和复圆时刻等信息。太阳望远镜全程拍摄了日偏食，基地内安放的标准气象设备，同时进行了日食期间的天文观测和气象观测，是天文与气象相结合的典型范例。即使是在日全食期间，大多情况温度下降也只有几℃，偏食期间相应的变化会更小，分析偏食时气象要素是否会有显著变化是一个值得研究的课题。定量分析日面变化和气象要素的变化及其相关性，可有效预测日食期间气象要素的变化。



图 1 2020 年 6 月 21 日中国境内日环食路径图（https://nadc.china-vo.org/eclipse/）

Fig. 1 The path of annular eclipse within China on 21 June 2020

2 日偏食太阳观测和气象观测

深圳市天文台位于广东省深圳市大鹏新区南澳半岛西涌，东、南、西三面环海，海拔224米，视宁度足以进行全日面光球和色球观测[15-16]。2020年4月，天文台完成三通道太阳望远镜升级，并投入使用，可在Hα（656.28 nm）和Ca $_{\rm II}$ K（393.37 nm）波段全日面观测色球、白光全日面观测光球。三通道全日面太阳观测能获取太阳黑子、暗条（日珥）和耀斑等太阳活动信息[17]，对认识太阳活动的物理本质和预测灾害性空间天气事件具有重要意义。此外，全日面色球望远镜观测日偏食同样具有科学研究价值，能为太阳物理和地球物理效应研究提供资料和信息[18]。

本文利用太阳三通道中的 Ca $_{\rm II}$ K 观测数据，Ca $_{\rm II}$ K 全日面望远镜的主镜口径 203 mm，后端配备 2048×2048 的 FLI CCD。本次日食观测期间，望远镜观测的时间分辨率是 10 分钟，观测时间从 14:31:09 到 17:21:18（世界时 06:31:09 – 09:21:18 UT），基本覆盖了整个日食过程，同时太阳三通道望远镜全程参与了日食科普直播。为了分析日食期间气象要素的变化，本文利用天文台内气象标准站观测的太阳辐射、温度、湿度和气压数据，观测时间分辨率为 1 分钟，时长为 3.5 小时（06:00 - 09:30 UT）。

深圳市天文台的日食初亏、食甚和复圆时间分别是06:37:41 UT、08:08:38 UT和09:24:30 UT。图2中用红色箭头连接的蓝色图像基本显示了日食的整个过程，蓝色图像是Ca $_{\rm II}$ K全日

面观测。从图像可以看出，06:31:09 UT时，日面完全无遮挡，（由于观测的时间分辨率，初亏开始时无观测），06:41:09 UT到09:21:18 UT，日面经历了被遮挡逐渐增加到被遮挡最多后，月球影子移开，日面变圆的过程。受限于时间分辨率，在食甚附近的08:11:14 UT时，太阳被遮挡最多。取气象要素太阳辐射变化为例，如图2中间曲线图所示，横坐标为世界时，纵坐标为太阳辐射，三条竖直的红色虚线分别是初亏、食甚、复圆时刻，竖直的绿色虚线是食甚附近观测到日面被遮挡最多的时刻。日食期间，从初亏开始，太阳辐射迅速减小，至食甚附近达到极小值，然后，辐射逐渐增加的过程。定量分析气象要素和日面面积的变化详见第3部分。

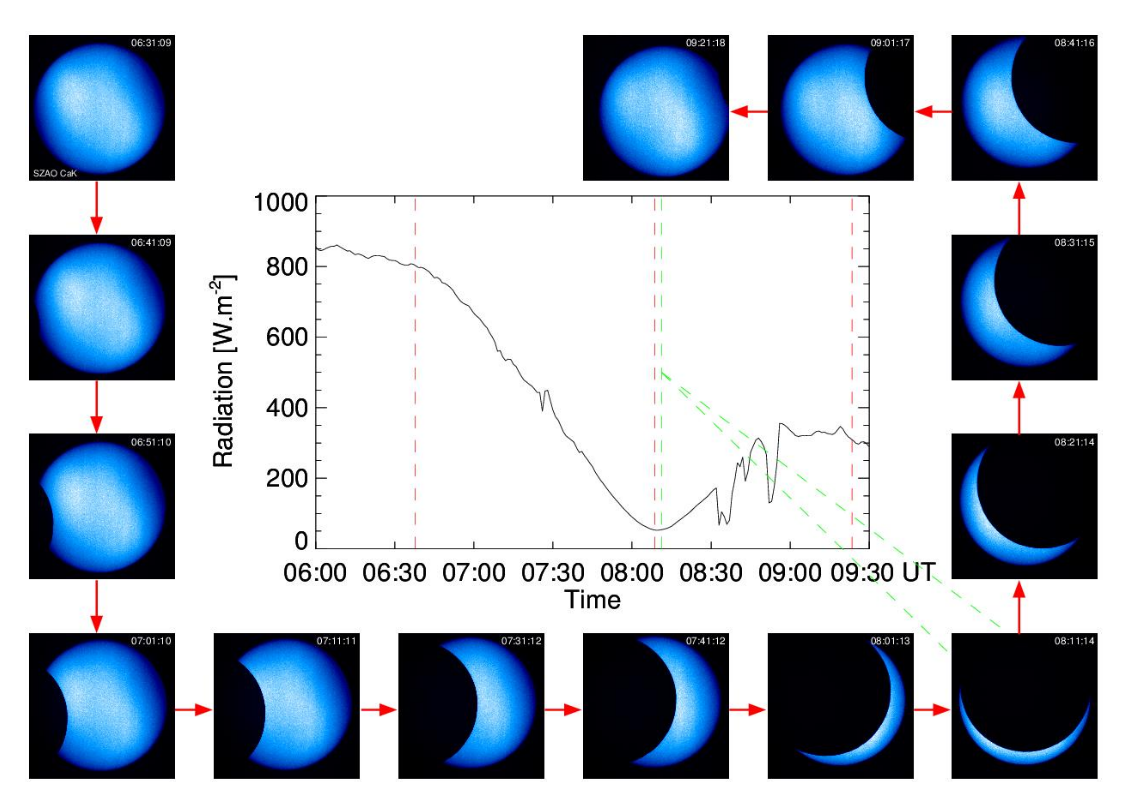


图 2 日食期间 Ca II K 波段日面和太阳辐射的变化

Fig. 2 Solar Ca $_{II}$ K full-disk observations and the variation of solar radiation during the partial eclipse

3 数据分析

3.1 日食期间气象要素分析

为了对比日食和无日食时太阳辐射、温度、相对湿度和气压的变化强弱，我们选取日食前后一天相同时间段的观测，如图 3 所示。图中三条竖直虚线分别是初亏、食甚、复圆时刻，红色实线表示 6 月 21 日日食期间各气象要素变化特性，蓝色点虚线和绿色虚线分别表示 6 月 20 日和 22 日相同时间段的变化特性。

图 3(a)显示了 6 月 20 日、21 日和 22 日三天 6:00 – 09:30 UT 太阳辐射变化。由于选取的时间段在下午，所以太阳辐射整体在下降，下降幅度约为 550 W•m^{-2}。如果没有日食发生，太阳辐射是个平滑缓慢的下降过程。当有日食发生时，初亏之后，太阳辐射急剧下降，下降到最低时为 52.60 W•m^{-2}（如果发生日全食，甚至可以到达 0 W•m^{-2}）。为了分析日食和非日食期间太阳辐射的下降变化程度，我们分别线性拟合 6 月 20 日、21 日和 22 日 06:37 - 08:08

UT（初亏—食甚）的观测数据，拟合后的斜率 k 分别为-2.8、-9.1 和-2.6，即初亏到食甚阶段，太阳辐射平均每分钟下降 9.1 W•m^{-2}，而非日食相同时间段太阳辐射平均每分钟下降 2.8 W•m^{-2} 和 2.6 W•m^{-2}。也就是说，日食期间太阳辐射的变化速率可达非日食的 4 倍左右。紫色箭头所指为太阳辐射到达最低点，受当天云的短时干扰以及受限于太阳辐射观测的时间分辨率，这个时刻相对于食甚时刻滞后 1.37 分钟，食甚后，随着日面被遮挡面积减小，太阳辐射开始上升。在上升过程中，可以看到太阳辐射强度有几次大的跌落，也是太阳被云短时遮挡。

图3(b)显示的是温度的变化，初亏到食甚阶段温度约下降了2℃，最低温度达27.70℃。经过类似处理太阳辐射数据过程，进行线性拟合发现，日食期间温度的变化率几乎比非日食期间高1个数量级。初亏到食甚阶段，温度平均每分钟下降0.02℃，而非日食期间平均每分钟下降0.003 – 0.004℃。太阳辐射下降后，温度才会随之减小，因此温度达到最低的时刻（紫色箭头所指）相对于食甚时刻滞后6.37分钟。温度在这个极小值持续7分钟后开始逐步回升。图3(c)显示的是相对湿度的变化，初亏到食甚阶段相对湿度约增加了10%，最高时可达93.0%。通过线性拟合，在这个阶段，相对湿度平均每分钟增加0.09%，而非日食期间平均每分钟增加0.02%。湿度达到最大值的时刻（紫色箭头所指）相对于食甚时候滞后6.37分钟。相对湿度最大值持续了33分钟后才开始逐步下降。此次日偏食期间，气压的变化不大，如图3(d)所示，初亏到食甚阶段气压约下降了1 hPa，并且和非日食时的变化像差不大，在这阶段气压平均每分钟约下降0.008 hPa。气压达到最低的时刻（紫色箭头所指）相对于食甚时刻滞后10.37分钟，持续25分钟后气压回升。

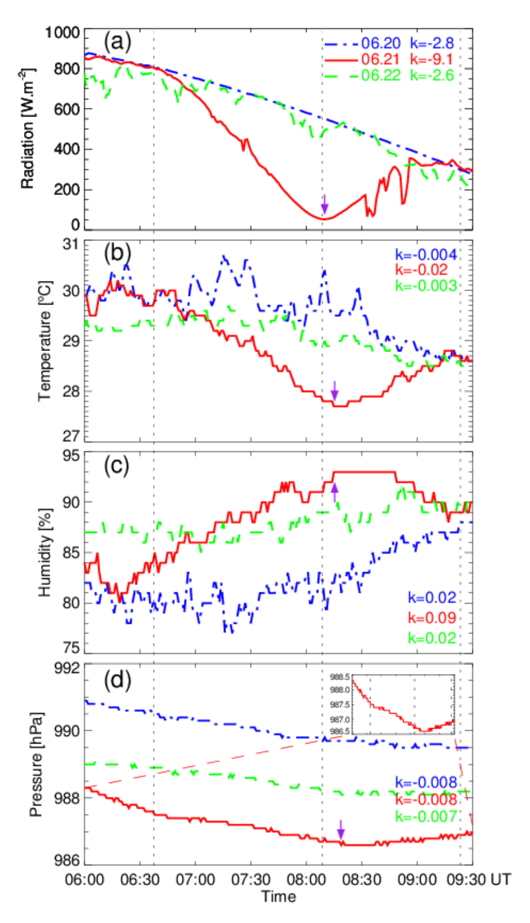


图 3 日食期间太阳辐射、温度、相对湿度和气压变化

Fig. 3 The variation of solar radiation, temperature, relative humidity and air pressure during eclipse

3.2 日面相对强度和气象要素的相关性

Ca $_{\rm II}$ K 全日面色球望远镜基本观测了整个日食过程，日食最直观的观测就是太阳日面被遮挡。日面相对强度变化和气象要素之间的相关性可用于分析气象要素对太阳的依赖程度。从太阳图像可以看出边缘部分比中心暗，这就是临边昏暗效应。靠近日面中心更亮意味着温度更高，这是由于越靠近中心，能够看到的太阳的层次更深。图 4(a)显示了日食开始前 06:31:09 UT 时的太阳图像，可以清晰地看出靠近日面中心更亮。图 4(b)的蓝色曲线轮廓是图 4(a)白色虚线上日面过中心点的强度变化轮廓。用可见光和红外连续谱中单色光观测太阳时，都会出现临边昏暗现象。在爱丁顿近似下，所有波段积分，日面各点相对于日面中心的强度为

$$I(\mu) = \frac{2+3\mu}{5} I(0) \qquad (1)$$

其中$\mu = \cos\theta$，θ为日心角距，$I(\mu)$为日面各点的强度，$I(0)$日心强度[19]。图 4(b)的黑色曲线显示了计算的相对太阳辐射强度随日面中心距离的变化。为了计算日食时日面的相对强度（以 08:11:14 UT 时的太阳图像为例），我们首先需要得知的是全日面各点的位置，通过数字图像处理过程和最小二乘法圆周拟合，我们可以算出全日面的圆心位置和圆面半径大小，在 2048×2048 的 CCD 中，圆心的位置为(1019, 1111)，圆面的半径为 917 像元，图 4(d)中的白色点就是拟合圆周，进而可得圆周内各个点的确切位置。根据可见日面和其他区域的亮度可以区分日牙和日面其他区域，图 4(e)用蓝点标记了可见日面的各个像元点，用黄点标记了日面其他点，把各个点的位置坐标和半径带入公式（1）可得相对强度，分别求和日牙内和日面圆周内的强度，相比可知此时的相对强度约为 0.10。

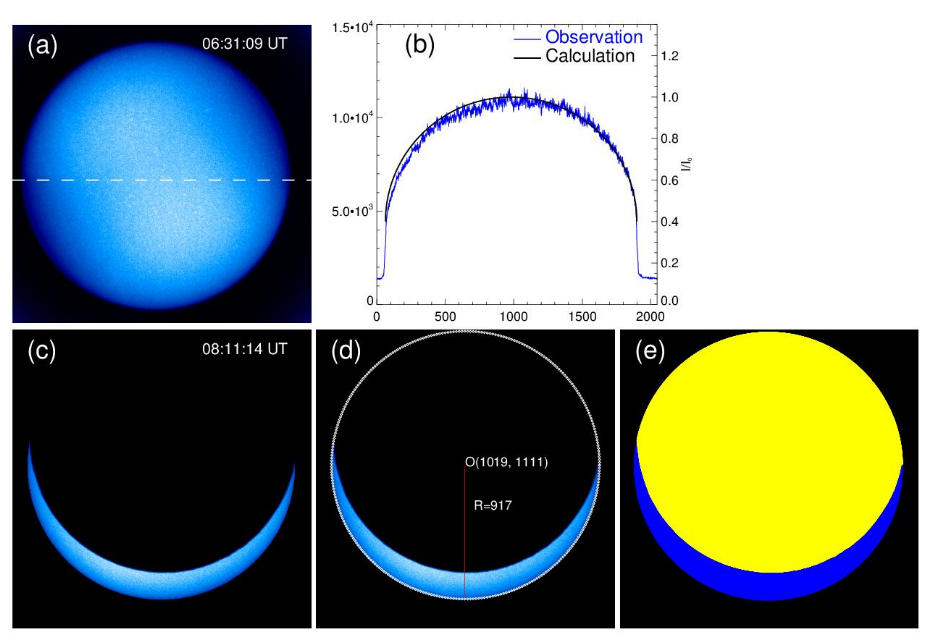


图 4 日食时可见日面的相对强度。（a）全日面图像；（b）过日心的日面强度变化曲线和计算的相对强度轮廓；（c）接近食甚时刻的太阳图像；（d）太阳图像和全日面轮廓；（e）蓝点标记的可见日面和黄点标记的剩余日面。

Fig. 4 The relative intensity of the visible solar disk during the eclipse. (a) Full-disk solar image; (b) The solar intensity and calculated relative intensity profile that through solar center; (c) The solar image near maximum of eclipse; (d) The solar image and the profile of solar full-disk image; (e) The visible solar disk marked with blue points and the remaining marked with yellow points.

为了分析日食期间日面相对强度的变化和气象要素变化之间的相关性，我们计算了从初亏到复圆时间序列日面强度相对于全日面强度的变化，如图 5 红色星点所示，相对强度的范围在 0 到 1（全食食甚时为 0）。显然，初亏到食甚，相对强度随可见日面的减小而减小，食甚到复圆，相对强度随可见日面的增大而增大，食甚时相对强度最小，日食未开始和结束后，相对强度为 1。从图可知，气象要素和日面相对强度之间有很强的相关性。从初亏到复圆阶段，日面相对强度和气象要素之间的皮尔森相关系数（Pearson Correlation Coefficient）分别为：日面相对强度和太阳辐射之间 R=0.95、和温度之间 R=0.89、和相对湿度之间 R=-0.82 以及和气压之间 R=0.75。这些相关系数都接近 1 或-1，说明它们之间有强相关性。太阳辐射强度是在单位时间单位面积内接收到的太阳辐射的强弱，和可见日面直接相关，所以相关性最强。其他气象要素相对于太阳辐射有滞后，相关性稍弱。

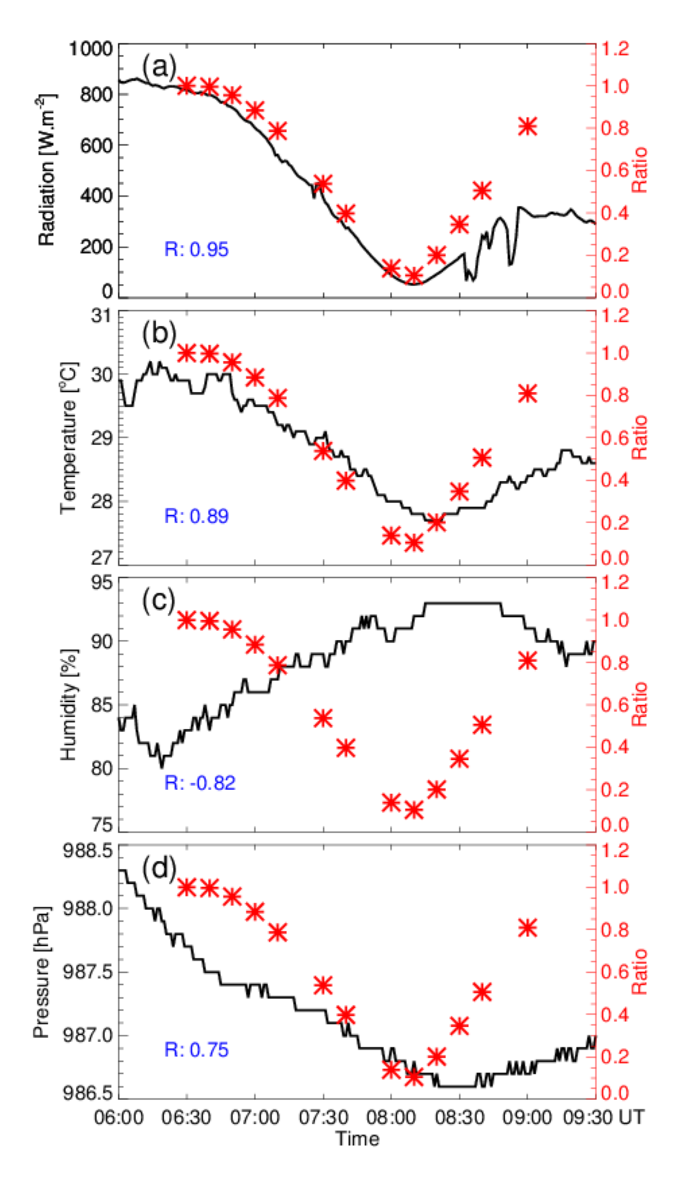


图 5 可见日面相对强度和气象要素的相关性

Fig. 5 The correlation between the relative intensity of visible solar images and solar radiation, temperature, relative humidity, and pressure, respectively

4 结论

大气科学观测的重要内容之一就是找出各个要素之间的相关性或是证明它们之间的非相关性，要理清它们之间的关系比较困难[14]。日食提供了一个独特的观测机会，用高灵敏度仪器精确观测日食带上多个点的气象要素，基于数据建模理论对进行解释[20]。本文给出了日食期间各气象要素的变化以及日面相对面和气象要素之间的相关性，主要结论有：

（1）日食期间，太阳辐射、温度和气压经历下降——上升的过程，其中温度和气压在最低值处分别持续了 7 分钟和 25 分钟，而太阳辐射则到达最低值后回升；

（2）日食期间，相对湿度经历了上升——持续——下降的过程，持续时间为 33 分钟；

（3）太阳辐射、温度、相对湿度和气压到达极值的时刻相对于食甚时候有滞后，滞后时间分别为 1.37 分钟、6.37 分钟、6.37 分钟和 10.37 分钟，滞后可能是由观测的时间分辨率和局地的天气条件造成的；

（4）日食期间，日面相对强度和气象要素之间的相关性很强，皮尔森相关系数分别达 0.95、0.89、-0.82 和 0.75，接近 1 或-1。

这些结论给出了特定点日食期间气象要素特性和可见日面变化及其相关性，综合其他点的观测，基于观测建模，对预测下一次日食期间气象要素特性有指导意义。

参考文献

[1] Golub L, Pasachoff J. Nearest Star: The Surprising Science of Our Sun [M]. Harvard Univ. Press, 2001

[2] Dyson F W, Eddington A S, Davidson C. A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919 [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. Lond. A, 1920, 220:291-333

[3] Pasachoff J M. Solar eclipses as an astrophysical laboratory [J]. Nature, 2009, 459(7248):789-795

[4] Pasachoff J M. Heliophysics at total solar eclipses [J]. Nature Astronomy, 2017, 1:0190-0198

[5] Aplin K L, Scott C J, Gray S L. Atmospheric changes from solar eclipses [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. A, 2016, 374(2077): 20150217

[6] Hanna E. Meteorological effects of the solar eclipse of 11 August 1999 [J]. Weather, 2000, 55(12):430-446

[7] Liu Yu, Shen Yuandeng, Zhang Xianfei, et al. Using a New Sky Brightness Monitor to Observe the Annular Solar Eclipse on 15 January 2010 [J]. Solar Physics, 2012, 279(2):561-572

[8] Marcos A. Peñaloza-Murillo. Optical Response of the Atmosphere During the Caribbean Total Solar Eclipses of 26 February 1998 and of 3 February 1916 at Falcón state, Venezuela [J]. Earth, Moon, and Planets, 2002, 91(3)125-159

[9] Hanna E, Penman J, Jónsson T, et al. Meteorological effects of the solar eclipse of 20 March 2015: analysis of UK Met Office automatic weather station data and comparison with automatic weather station data from the Faroes and Iceland [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. A, 2016, 374(2077): 20150212

[10] Founda D, Melas D, Lykoudis S, et al. The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece [J]. Atmos. Chem. Phys., 2007, 7(21):5543-5553

[11] 华行祥，朱兰娟，杨焕强. 日全食期间的杭州气象要素变化 [J]. 科技通报, 2013, 29(5):34-36

Hua Xingxiang, Zhu Lanjuan, Yang Huanqiang. Changes of upper air meteorological elements during total solar eclipse [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(5):34-36

[12] 马德栗，陈正洪，向华. 日全食期间武汉市气象要素变化特征 [J]. 气象科学, 2011, 31(1):54

Ma Deli, Chen Zhenghong, Xiang Hua. Change characteristics of meteorological factors in Wuhan during the total solar eclipse in cloudy situation [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2011, 31(1):54-60

[13] Mahmood R, Schargorodski M, Rappin E, et al. The Total Solar Eclipse of 2017: Meteorological Observations from a Statewide Mesonet and Atmospheric Profiling Systems [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc, 2020, 101 (6): E720-E737

[14] Harrison R G, Hanna E. The solar eclipse: a natural meteorological experiment [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. A, 2016, 374(2077):

20150225

[15] 梅林，王栋，何智宁. 深圳市天文台 Hα 全日面望远镜 [J]. 新经济, 2017, 8:41-45

Mei Lin, Wang Dong, He Zhining. Soalr Full-Disk Hα Telescopes at Shenzhen Astronomical Observatory [J]. New Economy, 2017, 8:41-45

[16] 梅林，吴翔，周作超. 深圳市天文台全天云图监测系统的设计与实现 [J]. 天文研究与技术, 2018, 15(2):232-239

Mei Lin, Wu Xiang, Zhou Zuochao. Design and implementation of the all-sky cloud Monitoring system at Shenzhen Astronomical Observatory [J]. Astronomical Research and Technology, 2018, 15(2):232-239

[17] Li Chuan, Fang Cheng, Li Zhen, et al. Chinese Hα Solar Explorer (CHASE) — a complementary space mission to the ASO-S [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11):165-170

[18] 赵世清，李琼英，陶金萍，等. 2009 年 7 月 22 日昆明日偏食太阳色球观测 [J]. 天文研究与技术, 2010, 7(2):85-88

Zhao Shiqing, Li Qiongying, Tao Jinping, et al. Observation of the solar chromosphere during the partial solar eclipse in July 22, 2009 in Kunming [J]. Astronomical Research and Technology, 2010, 7(2):85-88

[19] Stix Michael. The Sun: An Introduction [M]. 2nd ed. Springer, 2004.

[20] Clayton H H. The eclipse cyclone and the diurnal cyclones [J]. Ann. Astron. Observ. Harvard College, 1901, 43:1

The meteorological parameters analysis in Shenzhen Astronomical Observatory during the partial solar eclipse

Zheng Jianchuan Mei Lin Wang Dong Wu Liang Ye Jiahui

(Shenzhen National Climate Observatory (Shenzhen Astronomical Observatory), 518040, Shenzhen, China)

Abstract: On June 21, 2020, an annular eclipse happened in China and the path went through Tibet, Sichuan, Chongqing, Hunan, Jiangxi, Fujian and Taiwan, partial solar eclipse could be observed in other areas. The solar telescope in Shenzhen Astronomical Observatory observed the whole process of the partial solar eclipse. At the same time, the meteorological equipment settled in the Observatory obtained solar radiation, temperature, relative humidity, air pressure and other meteorological elements. The analysis of the observational data during the eclipse shows that: (1) solar radiation, temperature and air pressure declined and then ascended slowly from the first contact to maximum of eclipse. Because of the weather, the minimum time lagged behind to the time of eclipse maximum. The time of solar radiation lagged behind by 1.37 minutes, temperature lagged behind by 6.37 minutes and air pressure lagged behind by 10.37 minutes. (2) From the first contact to maximum of eclipse, the relative humidity ascended to the maximum value, lasted for 33 minutes, and then decreased. The maximum time lagged behind the time of eclipse maximum by 7 minutes. (3) Comparing the variation of meteorological parameters in the days before and after the solar eclipse, the rate of variation of solar radiation, temperature and relative humidity during the solar eclipse was about one order of magnitude higher than that without the solar eclipse. The variation of air pressure with/without solar eclipse was nearly same. (4) During the solar eclipse, the correlation between the relative intensity of the solar disk and meteorological parameters was strong, with the Pearson correlation coefficient are 0.95, 0.88, -0.81 and 0.77, respectively.

Key words: solar eclipse; solar radiation; temperature; relative humidity; air pressure